

반복과대하중에 의한 피로파괴거동의 고찰 An evaluation of Fatigue Crack Propagation Behaviors on Cyclic Overload Test

김용수* 신근하** 강동명*** 김병석****
Kim Yong Soo Shin Keun Ha Kang Dong Myeong Kim Byung Suk

ABSTRACT

The retardation effect of fatigue crack propagation after cyclic overloading seems to be affected by strain hardening exponent. Namely, for the material with high values of n , the delay effect is found to be severe.

We proposed a modified crack retardation equation which may apply the retardation of fatigue crack growth after a cyclic overloading, as

$$(da/dN)_{cyc} = (\mu n + \lambda) B \Delta K^q / [(1 - R_{eff}) K_{cf} - \Delta K]$$

where, R_{eff} is effective stress ratio $[=(K_{min} - K_{res}) / (K_{max} - K_{res})]$.

The constants $\mu = -0.5$ and $\lambda = 0.6$, and the values are found to be identical for materials such as aluminum (A 1060), steel (SS 34), brass (BsS1B) and stainless steel (SUS 304) used in this investigation.

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

공업의 발전과 더불어 산업구조물의 대형화 또는 최적 설계 개념의 도입으로 기계 제품의 경량화 추세에

따라 피로파괴에 대한 안전설계의 중요성이 더욱 요구된다.

피로파괴에 응력확대계수의 개념이 도입된 이래 연구는 활발히 진행되었고 규칙적인 반복하중 하에서의 피로균열 전파거동은 어느정도 규명이 가능하게 되었다.¹⁻²⁾

실제의 기계구조물들은 장기간에 걸쳐 복잡하게 변동하는 하중의 영향을 받으며 일반적으로 행하여지는 기본 피로시험인 일정응력진폭시험의 결과를 그대로 적용할 수 없다. 그러므로 변동하중하에서의 피로균열 전파거동은 부하 응력 조건에 따른 검토가 선행되어야

* 정회원 서울산업대학
** 정회원 아주대 생산자동공학과
*** 정회원 서울산업대학 산업안전공학과 강사
**** 정회원 한국산업인력관리공단

야 한다.

변동하중의 기본 형태로서 단일과대하중 또는 반복과대하중^{3~7)} 등의 다양한 시험에 의한 피로균열전파 거동의 연구가 시도되고 있으나 시험에 사용된 재료에 따라 피로균열전파거동이 다르게 나타나며 또한 실험 방법도 일정하지 않아 이 분야에 대한 체계적인 연구가 요망된다.

규칙적 또는 불규칙적인 반복하중이 작용하였을 때 구조물의 피로균열전파거동은 여러가지 요인의 영향을 받으나 특히 재료 자체의 기계적 성질과 밀접한 관계가 있으며 근본적으로는 균열선단에 형성되는 소성역의 역학적 거동의 영향을 많이 받을 것으로 생각된다.³⁾

본 연구에서는 균열선단에서 소성역의 역학적 조건을 변화시키는 반복과대하중 피로시험을 통하여 재료의 기계적 성질 가운데 소성역의 특성을 잘 나타내는 가공경화지수가 피로균열전파거동에 끼치는 영향을 검토하였으며 대부분의 기계구조물이 사용 중에 받는

하중이 변동하중임을 감안할 때 아직 체계화 되지 못한 변동하중하의 피로균열 전파거동 해석의 자료로 활용하는 데 도움을 주기 위하여 본 연구를 수행하였다.

2 이 론

본 연구의 균열지연 모델을 설정하여 이론식을 기술 하겠다.

실제의 피로설계에 자주 사용되는 균열지연 모델로는 Wheeler와 Willenborg의 모델을 들수 있다.^{8~9)}

이 모델들의 개념은 초기의 과대하중에 의해 발생된 과대소성영역을 통과할 때 균열성장이 계속 지연되는 현상을 모델화 한 것이다.

Wheeler 모델은 현재의 저하중 사이클 이전의 과대하중 사이클로부터 결정되는 과대소성영역의 크기와 저하중사이클의 소성영역의 크기를 다음과 같이 표시 한다(Fig.1 참조).

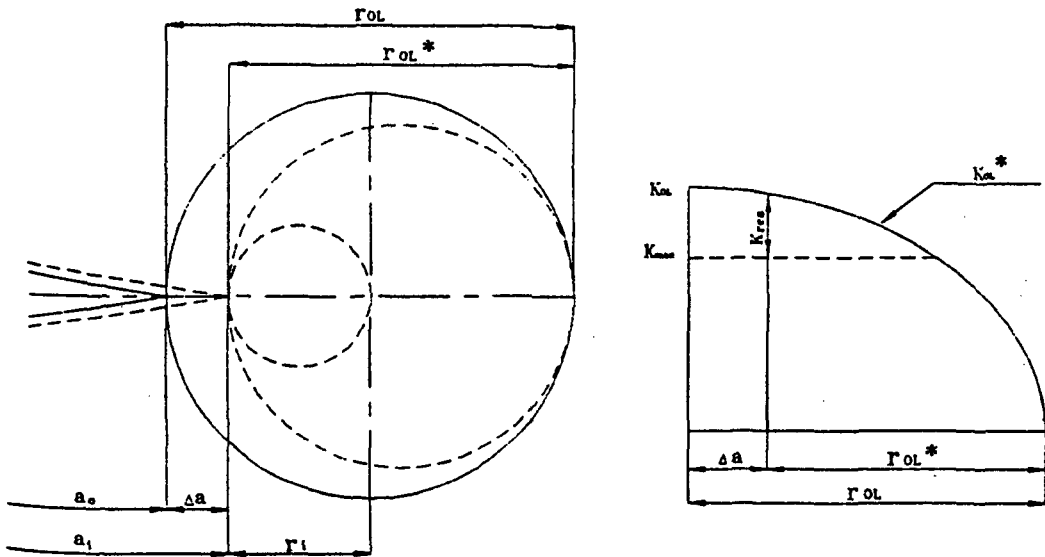


Fig. 1 Schematic representation of crack retardation mode 1

$$(da/dN)_{ret} = C_p (da/dN) \quad (1)$$

여기서 C_p 는 $[r_i/(a_0-r_i-ai)]^p$ 이고 p 는 실험결과로 결정되는 조정지수(shaping exponent)이며 $(da/dN)_{ret}$ 와 (da/dN) 는 자연 피로균열성장속도와 정상적인 피로균열성장 속도이다.

Willenborg 모델에서는 이러한 자연현상을 유효응력의 개념 즉, 과대인장소성영역에 의한 압축잔류응력이 유효응력을 감소시킨다는 설명에서 다음과 같이 표시하였다.

Fig. 1에서와 같이 초기의 과대하중에 의해 발생한 과대 소성영역(r_{OL})을 균열이 통과하면 $r_{OL}^* = r_{OL} - \Delta a$ 이 되고, r_{OL}^* 에 대한 상당과대응력확대 계수를 K_{OL}^* 라 하면 다음과 같다.

$$r_{OL} = C_1 (K_{OL} / \sigma_{ys})^2 \quad (2)$$

$$K_{OL}^* = K_{OL} (1 - \Delta a / r_{OL})^{1/2} \quad (3)$$

여기서 K_{OL} 은 과대응력확대계수, C_1 은 상수이며 $\Delta a = ai - a_0$ 이다.

$$K_{res} = K_{OL}^* - K_{max,i} \quad (4)$$

따라서 유효응력확대계수와 유효응력비는 다음과 같다.

$$K_{max,eff,i} = K_{max,i} - K_{res} = 2K_{max,i} - K_{OL}^* \\ K_{min,eff,i} = K_{min,i} - K_{res} \\ = K_{max,i} + K_{min,i} - K_{OL}^* \quad (5)$$

$$R_{eff} = K_{min,eff,i} / K_{max,eff,i} \quad (6)$$

이 식을 Forman의 피로균열전파식에 적용하면 다음과 같이 된다.

$$(da/dN)_{ret} = B \Delta K_{eff}^q / [(1 - R_{eff}) K_{cf} - \Delta K_{eff}] \quad (7)$$

여기서 B 와 q 는 재료 상수이다.

3. 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 두께가 2mm인 알루미늄(A 1060), 냉간압연강재(SS 34), 황동(BsS1B) 및 스테인레스강(SUS 304) 등 기계적 성질이 상이한 4가지 재료이며 이들 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1. CHEMICAL COMPOSITIONS

(wt %)

Aluminum (A 1060)	Fe	Si	Ti	P	Ni	Zn
	0.33	0.042	0.014	0.006	0.003	0.003
Steel (SS 34)	C	Mn	P	S	W	Cr
	0.035	0.31	0.006	0.007	0.47	0.012
Brass (BsS1B)	Cu	Zn	Fe	Pb	Ni	
	68.19	31.45	0.141	0.01	0.072	
Stainiss steel (SUS 304)	C	Cr	Ni	P	S	
	0.07	19.97	9.94	0.03	0.012	
	Mn	Si	W	V	Mo	
	0.66	0.42	3.35	0.225	0.23	

모든 시험편의 길이 방향은 판의 압연방향에 수직이 되도록 절단 가공하였으며 재료의 기계적 성질을 알아보기 위하여 ASTM E8의 규정에 의거 인장시험편을 제작하였다.

피로 시험편은 ASTM E647의 규정에 따라 Fig. 2에 보인 바와 같이 CCT(center cracked tension) 시험편이다.

재료의 기계적 성질을 알아보기 위한 인장시험은 만능재료시험기(Toyo Baldwin co. : 10ton)를 사용하였으며 단순인장시험(monotonic tension test)과 반복인장시험(cyclic tension test)에서 구한 기계적 성질은 Table 2와 같다.

피로 시험기는 유압식 Servo 피로시험기(Saginomiya Co. : 50ton)를 사용하였으며 피로시험

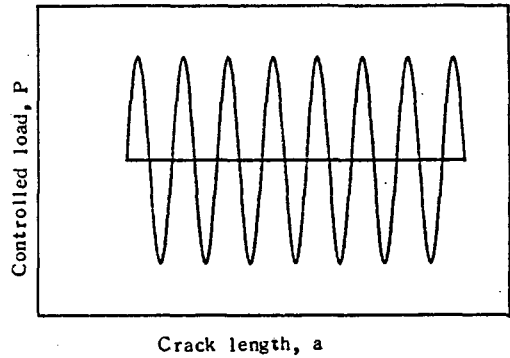
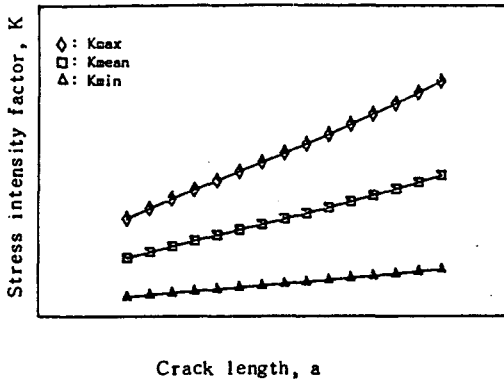


Fig. 2 Stress intensity factor vs. crack length in constant stress amplitude test (ΔK increasing test)

Fig. 3 Controlled load vs. crack length in constant stress amplitude test (ΔK increasing test)

Table 2. Mechanical properties (monotonic & cyclic stress-strain tests)

Material properties Materials	Young's modulus E(MPa)	Yield strength mono./cyclic σ_{ys}/σ'_{ys} (MPa)	Tensile strength mono./cyclic σ_u/σ'_u (MPa)	Strain hardening exponent mono./cyclic n/n'
Aluminum(A1060)	5.58×10^4	112/97	125/108	0.065/0.05
Steel(SS34)	2.03×10^5	284/314	363/397	0.10 /0.14
Brass(BsS1B)	1.09×10^5	320/315	390/400	0.15 /0.16
Stainless steel (SUS 304)	2.05×10^5	300/365	720/780	0.49 /0.38

의 파형으로는 10Hz의 정현파(sine waves)를 택하였다.

균열의 측정은 피로시험편을 시험기에 장착한 후 1/100mm까지 측정 가능한 이동식 현미경(travelling microscope)을 이용하여 관찰 및 측정을 하였다.

재료의 인장시험을 바탕으로 각 재료의 최대하중(P_{max})과 최소하중(P_{min}) 및 응력비($R=0.2$)는 Table 3과 같이 설정하고 각 재료의 기본 피로균열전파거동을 파악하기 위하여 일정응력진폭 피로시험(ΔK 증가 시험)을 행하였다. Fig.2와 Fig.3에 이 시험에서의

Table 3. Load conditions in constant stress amplitude test

Materials	Load conditions	P_{max} (KN)	P_{min} (KN)	Stress ratio (R)
Aluminum (A 1060)		7.4	1.5	0.2
Steel (SS 34)		19.6	3.9	0.2
Brass (BsS1B)		19.6	3.9	0.2
Stainless steel (SUS 304)		22.0	4.4	0.2

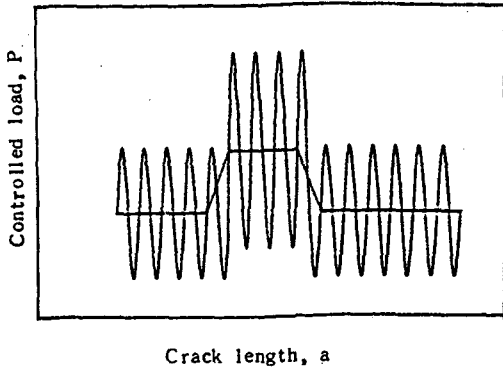


Fig. 4 Controlled load vs. crack length in cyclic overload test

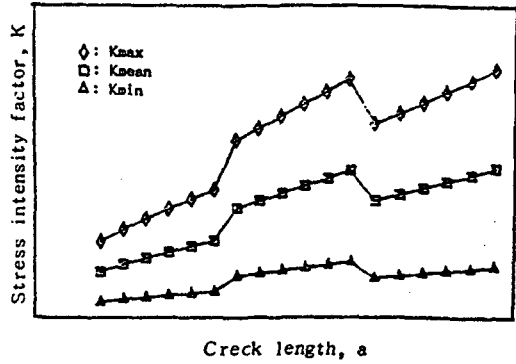


Fig. 5 Stress intensity factor vs. crack length in cyclic overload test

하중반복회수, 응력확대계수 및 균열길이의 관계를 도식적으로 설명하였다.

반복과대하중시험(cyclic overload test)은 기본피로시험(ΔK 증가시험)과 같은 조건으로 실험을 행하여 피로 균열전파의 안정성장구역 초기영역에 도달시킨 후 반복 과대하중을 가한 다음 다시 기본 피로시험과 같은 조건으로 돌아왔을 때의 피로균열전파거동을 살펴보는 시험이다.

Fig. 4과 Fig. 5에 반복과대하중시험 때의 균열 길이에 대한 응력확대계수의 변화 및 반복하중의 변화를 나타내었다.

반복과대하중은 반복하중회수가 균열지면에 영향을 끼침을 감안하여 각 재료에 대해 균열이 양쪽으로 약 2-3mm 정도 진전될 때까지 가하였는데 이 때에 과대하중에 의한 응력확대계수는 기본피로시험의 피로균열안정성장영역에서 응력확대계수 범위를 벗어나지 않도록 하였다. 응력비는 기본피로시험과 동일하게 0.2이며 과대하중비 즉, $[(P_{ov,max} - P_{max}) / \Delta P] \times 100$ 은 22.5%로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

이 시험의 결과를 하중반복회수에 대한 균열반 길이의 관계로 나타내었는데 그중 대표적으로 스테인레스강(SUS 304)을 Fig. 6에 나타내었다. 이들 그림을 보

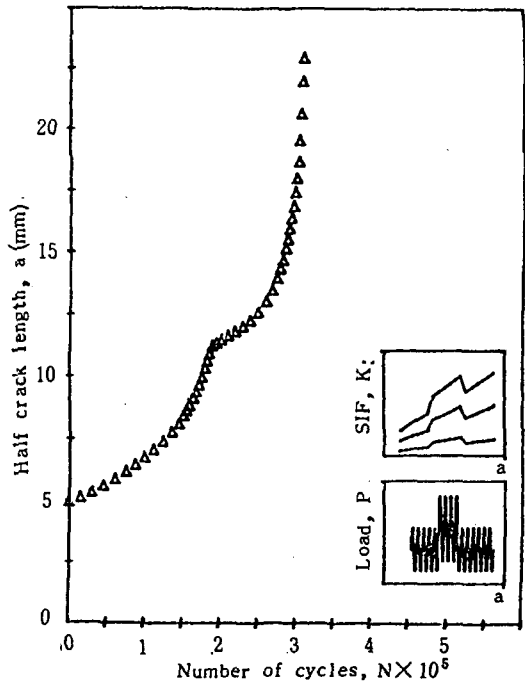


Fig. 6 Half crack length vs. number of cycles for stainless steel (SUS 304) in cyclic overload test

면 기본피로시험과 같은 하중조건으로 반복하중을 가하다 최대하중(P_{max}), 최소하중(P_{min}) 및 하중진폭이 모두 증가하는 과대반복하중을 가하였을 때의 균열 길

Table 4. Load conditions in constant stress amplitude test

Load conditions Materials	Constant load amp		Cyclic overload		stress ratio (R)
	P_{max} (KN)	P_{min} (KN)	P_{max} (KN)	P_{min} (KN)	
Aluminum (A 100)	7.5	1.5	8.85	1.77	0.2
Steel (SS 34)	20	4	23.6	4.72	0.2
Brass (Bs1B)	20	4	23.6	4.72	0.2
Stainless steel (SUS 304)	22.0	4.4	25.96	5.19	0.2

이는 크게 증가하며 반복과대하중 후 다시 초기상태와 같은 일정하중진폭을 적용시켰을 때의 균열길이의 증가는 잠시 둔화되었다가 점차 증가폭이 커짐을 보인다.

각 재료에 대한 피로균열전파거동을 살펴보기 위하여 $da/dN - \Delta K$ 로 정리하여 나타내었는데 그중 스테인레스강(SUS 304)의 경우를 Fig. 7에 각각 나타내었다.

반복과대하중을 적용시켰을 때의 균열전파속도는 가공경화지수(n)가 가장 적은 알루미늄($n=0.065$)에 있어서 기본피로시험 때의 정상적인 균열전파속도 보다 크게 나타났으며, $0.1 < n < 0.2$ 인 압연강($n=0.10$), 황동($n=0.15$)에서는 거의 같게 그리고 스테인레스강($n=0.49$)에서는 정상적인 균열전파속도보다 오히려 낮게 나타났음을 알 수 있다.

반복과대하중이 작용할 때 피로균열전파거동을 기

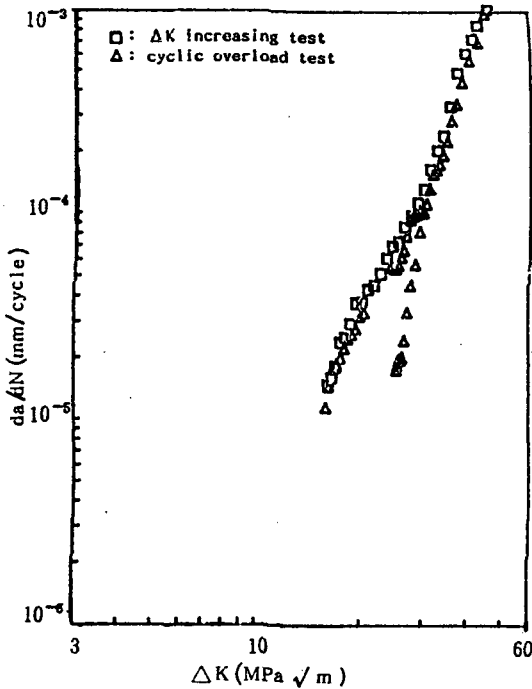


Fig. 7 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range for stainless steel (SUS 304) in cyclic overload test

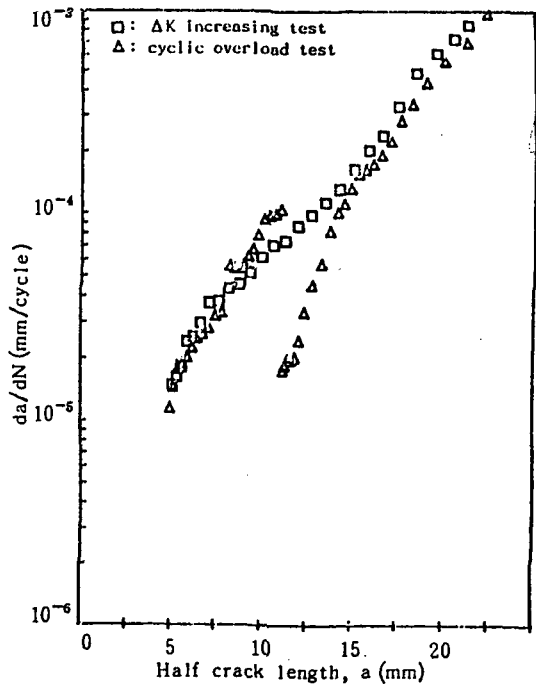


Fig. 8 Fatigue crack growth rate vs. half crack length for stainless steel (SUS 304) in cyclic overload test

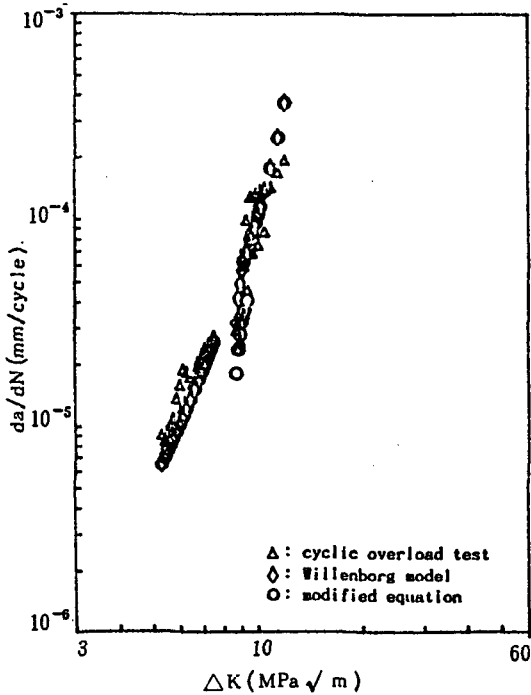


Fig. 9 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range for aluminum (A 1060) in cyclic overload test

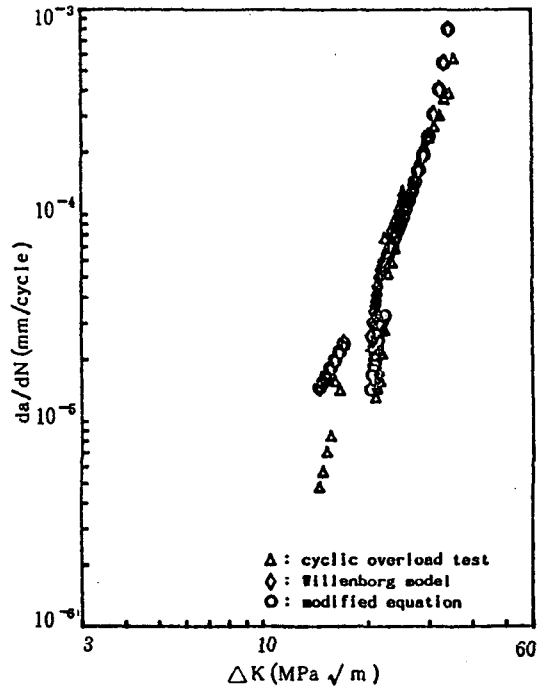


Fig. 10 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range for steel (SS 34) in cyclic overload test

본피로시험과 비교하면 가공경화재인 알루미늄의 최대응력확대계수(K_{max})의 증가에 따라 균열선단 소성역의 가공경화현상에 의해 균열진전에 크게 기여하는 반면, 가공경화재인 스테인레스강의 경우는 균열선단 소성역의 가공경화현상에 의하여 균열이 지연되는 것으로 생각된다.

반복과대하중을 가한 직후의 균열전파속도가 지연

되는 효과는 알루미늄($n=0.065$)이 가장 작게 그리고 스테인레스강($n=0.49$)의 경우가 가장 크게 나타났다. 즉, 가공경화지수가 커질수록 대체로 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 가공경화지수가 큰 재료일수록 균열단합 효과가 더욱 커서 피로균열전파 속도를 저하시킨다고 추측된다.

각 재료에 대한 피로균열전파거동을 더욱 자세하게

Table 5. Summary of cyclic overload results

Materials	K_{OL} (MPa√m)	K_{max} (MPa√m)	r_{OL} (mm)	%PL
Aluminum (A 1060)	12.73	10.79	4.11	22.5
Steel (SS 34)	31.66	26.85	3.96	22.5
Brass (BsS1B)	34.49	29.22	3.70	22.5
Stainless steel (SUS 304)	36.13	30.61	4.02	22.5
$\%PL = [(P_{ov,max} - P_{max}) / \Delta P] \times 100$				

관찰하기 위하여 균열 반 길이에 대한 피로균열 전파 속도와의 관계로 Fig. 8에 스테인레스강을 대표적으로 나타내었다. 이들 그림은 균열길이의 증가에 따라 균열전파속도의 가속 내지 지연관계를 뚜렷이 나타내 주고 있다.

다음은 과대반복하중으로 인한 지연현상을 Willenborg 균열지연 모델과 비교하여 검토하였다.

이론식의 Willenborg 모델에 대한 설명에서 과대하중에 의한 소성영역(r_{OL})은 식 (3) $r_{OL} = C_1(K_{OL}/\sigma_{ys})^2$ 이며 여기서 $C_1=1/\pi$ 로 하였다. 이 식을 식 (4)에 대입하면 상당 과대응력확대계수(K_{OL}^*)는 $a_i + r_i < a_0 + r_{OL}$ 범위에서 $K_{OL}^* = \sigma_{ys}[\pi(r_{OL} - \Delta a)]^{1/2}$ 이 된다.

Table. 5에는 저하중사이클 바로직전 과대하중 사이클의 과대응력확대계수(r_{OL}), 최대응력확대계수(K_{max}) 및 계산된 과대소성영역의 크기(r_{OL})를 재료별

로 나타내었다. 이 값을 이용하여 압축잔류응력(K_{res})을 계산하고 유효응력비(R_{eff})를 구하여 Willenborg 모델의 피로균열 지연식($da/dN)_{ret}$ 즉,

$$(da/dN)_{ret} = B \Delta K^n / [(1 - R_{eff})K_{cf} - \Delta K]$$

에 대입하여 알루미늄은 Fig. 9, 압연강은 Fig. 10, 황동은 Fig. 11 및 스테인레스강은 Fig. 12에 각각 나타내었다. 여기서, 과대하중후 균열지연이 일어나기 전까지의 피로균열전파속도는 기본 실험에서 실험적 (Forman's eq.)을 사용하였다. 각 재료에 대하여 반복과대하중에 의한 실험결과를 Willenborg 모델의 균열지연거동과 비교하여 보면 가공경화지수가 큰 스테인레스강($n=0.49$)의 경우가 가장 큰 차이를 보이며 가공경화지수가 가장 작은 알루미늄($n=0.065$)의 경우가 가장 작게 나타남을 알 수 있다.

반복과대하중 후의 피로균열 지연거동에 대하여 Willenborg모델을 수정하여 다음과 같은 실험식

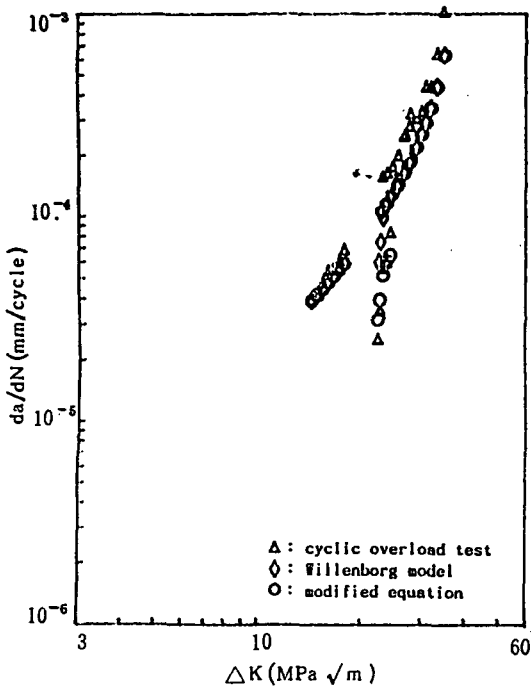


Fig. 11 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range for brass (BsS1B) in cyclic overload test

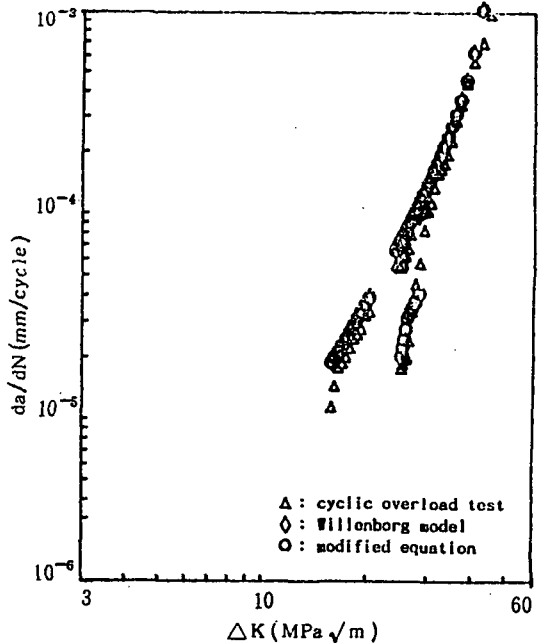


Fig. 12 Fatigue crack growth rate vs. stress intensity factor range for stainless steel (SUS 304) in cyclic overload test

Table 6. Comparison of number of applied cycles during crack retardation (N_d) (experimental data, Willenborg model and modified equation)

Materials	N_d		
	Experiment	Willenborg	Modified eq.
Aluminum (A 1060)	59000	37500	59900
Steel (SS 34)	79000	37300	67800
Brass (BsS1B)	34300	17700	33700
Stainless steel (SUS 304)	79000	25000	70000

$[(da/dN)'_{cyc}]$ 을 제안하였다. 즉,

$$(da/dN)'_{cyc} = (\mu_n + \lambda) B \Delta K^q / [(1 - R_{eff}) K_{cf} - \Delta K]$$

여기서, R_{eff} 는 유효응력비로서 $R_{eff} = (K_{max} - K_{res}) / (K_{max} - K_{res})$ 이고 상수 μ 와 λ 는 본 연구의 네 가지 재료에 대하여 동일하게 $\mu = -0.5$, $\lambda = 0.6$ 이다.

Table 5에는 반복과대하중에 의해 균열전파지연 동안에 작용된 하중반복회수(N_d)와 Willenborg모델 및 수정 제안된 식을 수치적분하여 구한 지연반복회수와 비교하였는데 제안된 수정식에 의한 결과가 Willenborg모델의 지연식에 의한 값보다 실험치에 가까움을 알 수 있다.

이상의 반복과대하중 시험결과를 고찰하여 보면 가공경화지수가 작은($n < 0.1$) 재료에서는 ΔK 증가시험 내지 과대반복하중이 작용할 때 균열선단의 소성역이 연화하여 균열 진전에 크게 기여하는 반면, 가공경화지수가 큰($n > 0.1$) 재료에서는 균열선단에서의 소성역이 경화현상을 나타내어 균열진전에 기여하는 정도가 작다고 생각된다.

또한, 반복과대하중후 균열의 지연현상은 가공경화지수가 커짐에 따라 크게 나타났다.

5. 결 론

반복과대하중을 적용시켰을 때 가공경화지수(n)가 작은($n < 0.1$) 재료는 균열선단의 소성력이 연화하여 균열진전에 크게 기여하는 반면 가공경화지수가 커질수록($n > 0.1$) 균열선단에서의 소성역이 경화현상을 나타내어 균열진전에 기여하는 정도가 적게 나타났다.

또한 과대반복하중 후의 균열지연현상은 가공경화지수가 커짐에 따라 크게 나타났다.

반복과대하중 후의 피로균열 지연거동에 대하여 Willenborg모델을 수정하여 다음과 같은 실험식 $[(da/dN)'_{cyc}]$ 을 제안하였다.

$$(da/dN)'_{cyc} = (\mu_n + \lambda) B \Delta K^q / [(1 - R_{eff}) K_{cf} - \Delta K]$$

여기서, R_{eff} 는 유효응력비로서 $R_{eff} = (K_{max} - K_{res}) / (K_{max} - K_{res})$ 이고 상수 μ 와 λ 는 본 연구의 네 가지 재료에 대하여 동일하게 $\mu = -0.5$, $\lambda = 0.6$ 이며, 실험결과와 잘 일치하였다.

참고문헌

- 1) Lal, K.M. and Garg, B.L., 1977, "A Fatigue Crack Propagation Model for Strain Hardening Materials", Eng. Frac. Mech., Vol.9, pp.939-949.
- 2) Dover, W.D. and Hibberd, R.D., 1977, "The Influence of Mean Stress and Amplitude Distribution on Random Load Fatigue Crack Growth", Eng. Frac. Mech., Vol.9, pp.251-263.
- 3) Kim, S.C. and Kang, D.M., 1988, "Correlation between Strain Hardening Exponents and Fatigue Crack Propagation", Proceedings of the VI International Congress on Experimental Mechanics, pp.987-992.
- 4) Vecchio, R.S., Herzberg, R.W. and Jaccard R., 1984, "On the Overload Induced Fatigue Crack

- Propagation Behavior in Aluminium and Steel Alloys", *Fatigue of Eng. Material and Structure*, Vol.7, No.3, pp.181-194.
- 5) Sharpe, W.N. Jr., Corbly, D.M. and Grandt, A.F. Jr., 1976, "Effects of Rest Time on Fatigue Crack Retardation and Observation of Crack Closure", *ASTM STP 595*, pp.61-77.
 - 6) Tokaji, K., Ando, A., Nagae, K. and Imai, T., 1985, "Effect of Sheet Thickness on Fatigue Crack Retardation in High Tensile Strength Steel and Validity of Crack Closure Concept", *Trans. JSME*, Vol.462, pp.318-325.
 - 7) Suresh, S., 1985, "Fatigue Crack Deflection and Fracture Surface Contact: Micro Mechanical Models", *Met. Trans.*, Vol.16A, pp.249-260.
 - 8) Wheeler, O.E., 1971, "Spectrum Loading and Crack Growth", *ASME, Jr. of Basic Eng.*, Vol.94, pp.181-186.
 - 9) Willenborg, J., Engle, R.M. and Wood.H.A., 1971, "A Crack Growth Retardation Model Using An Effective Strength Concept", *AFFDLTM-71-1-FBR*.